

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ГИДРОМЕХАНИКИ АН УКРАИНЫ

На правах рукописи

КОЖЕКИН Владимир Александрович

УДК 532.526.4:532.517.4

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ МОДЕЛИ
ПЕРЕМЕЖАЕМОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

01.02.05 — «Механика жидкости, газа и плазмы»

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

АВАНТ
Работа выполнена в Донецком Государственном Университете
(г. Донецк).

Научные руководители: член-корреспондент АН УССР,
профессор *И. Л. Повх*; кандидат технических наук, доцент
А. Д. Тищенко.

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Л. Г. Красный; доктор физико-математических наук, профессор
В. Т. Мовчан.

Ведущая организация — Киевский Государственный
Университет им. Т. Г. Шевченко.

Защита состоится «.....»..... 1994 г. в ча-
сов на заседании специализированного совета Д. 01.04.01 при Ин-
ституте гидромеханики АН Украины (252057, Киев, ул. Желябо-
ва, 8/4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
гидромеханики АН Украины.

Автореферат разослан «.....»..... 1994 года.

Ученый секретарь
специализированного совета
Д.01.04.01, доктор физико-
технических наук

С. И. КРИЛЬ

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00802208 (К)

Общая характеристика работы.

Актуальность темы:

Вопросы турбулентного обмена, тепло-массо-переноса и распространения примесей в океане являются предметом интенсивного изучения в современной гидрофизике. Отмечалось [Озмидов, 1981], что существует по меньшей мере семь механизмов генерации океанической турбулентности, которая в основной толще вод распределена не непрерывно, а сосредоточена в пятнах, возникающих вследствие неустойчивости внут- ренних волн, и в слоях микроструктуры, образующихся в результате интрузии этих пятен. Много- факторный процесс порождения и гашения турбулентности создает доста- точно сложную картину ее формирования, характеризуемую сильной переме- жаемостью - чередованием интенсивного турбулентного и квазиламинарно- го режимов. Поскольку универсальные закономерности, справедливые для полностью турбулентных течений, не установлены для мелкомасштабной морской турбулентности, перемежаемость вызывает повышенный интерес и интенсивные исследования сдвиговых течений, струй и следов в стратифи- цированной среде на экспериментальном и теоретическом уровнях.

Давно ясно [Брадшоу, 1974], что средневзвешенные значения, определен- ные только по интервалам времени турбулентного течения, несут больше информации о течении, нежели средние, вычисленные по всему интервалу времени. Поэтому применение вероятностных представлений с использо- ванием ноль-единичной функции перемежаемости в качестве весовой, позво- ляет провести более глубокие исследования взаимодействия различных частей турбулентного поля. В частности, разработаны формальные методы условно-выборочного анализа [Допазо, О'Брайен, 1982] и выведены услов- ные уравнения неразрывности, количества движения, энергии, завихренности и сохранения скалярной примеси для турбулентных и нетурбулентных зон, а также осуществлена их "сшивка" и численное решение для случая затоп- ленной струи. Предпосылки таких подходов еще ранее были заложены в ра- ботах Либби, ЛаРуа, Хедли и Ламли. Однако эти методы локального исследо- вания течений громоздки в обработке большого объема данных, получаемых при зондировании значительных по масштабам районов океана. Для прове- дения глобальных и региональных синоптико-климатологических исследо- ваний было предложено [Беляев, Озмидов, 1980] по результатам зондиров- ний вычислять эффективные значения коэффициентов вертикального и го- ризонтального турбулентного обмена, а также диффузии примеси, что заме- тно упрощало систему уравнений сохранения и тепло-массо-переноса. Эф- фективные значения коэффициентов зависят в большой мере от вида ста- тистических распределений длительностей турбулентных и нетурбулентных слоев, а также от точности установления параметров этих распределений в ходе обработки и интерпретации данных перемежаемой турбулентности.

В большинстве работ, использующих методы условно-выборочного осреднения при анализе турбулентности, такие статистические параметры, как частота следования турбулентных "пачек", коэффициент перемежаемости и связанные с ними средние протяженности турбулентных и нетурбулентных зон определяются с объективной мерой неопределенности, величина которой зависит от выбора параметров, называемых уставками классификации. Однако, до сих пор не разработано единого подхода в методах обработки данных перемежаемости, что ведет зачастую к несопоставимости результатов различных авторов. Даже в работах последнего периода преобладают либо субъективные методы коррекции пороговых уставок, либо эмпирически устанавливаемые. В связи с этим актуальными являются задачи:

- разработки адекватных статистических моделей морской перемежаемости;
- создания методов, алгоритмов ее отслеживания и обработки данных;
- установления соотношений и процедур, обеспечивающих поиск мелкомасштабных турбулентных структур и определение функции перемежаемости по апостериорному количеству поступающей информации;
- построения теории отображения стохастической геометрии турбулентных пятен, заданных осредненной пространственной конфигурацией;
- формулировки меры неопределенности для оптимизации пороговых значений параметров классификации и нахождения максимального порога неопределенности, позволяющего верно интерпретировать данные перемежаемости.

Целью работы являлось:

1. Построение численно-аналитических моделей естественной перемежаемости моря;
2. Моделирование динамики отображения конфигурации пятнистой структуры гидрофизического поля, проведение на этой базе теоретического и численного анализа, имитационного моделирования стохастических полей и процесса их зондирования для выработки методик и рекомендаций по информационному и техническому обеспечению систем управления зондированием;
3. Проверка адекватности стохастической геометрии и метрических свойств имитационного поля измеряемых гидродинамических первичных параметров реальным природным объектам с развитой турбулентностью и значительной перемежаемостью;
4. Разработка информационных подходов к анализу данных перемежаемости и создание теоретически обоснованной методологии, позволяющей повысить точность гидрофизического эксперимента и автоматизировать его.

Научная новизна работы.

1. Впервые дано теоретическое обоснование применимости асимптотических

соотношений в качестве допущений о функциях распределений исходных признаков классификации перемежаемой турбулентности — интервалов пересечений, провалов и выбросов.

2. Предложена аналитическая теория пространственного представления стохастической конфигурации структурных неоднородностей перемежаемого поля турбулентности.

3. Решена задача оценки априорной и апостериорной информативности исходных признаков классификации перемежаемых зон.

4. Разработан алгоритм информационного детектирования структурных неоднородностей и предложена мера количественной оценки ошибок его работы, позволяющая осуществить оптимизацию классификационных параметров.

5. Предложена модель и теория индикаторных бинарных полей, отражающих принадлежность областей гидрофизического поля к аномальной либо фоновой структуре турбулентности.

6. Проведено имитационное моделирование поиска и отображения кластеров на ЭВМ и даны результаты верификации аналитических выводов в натуральных экспериментах.

7. Установлена идентичность фрактальных свойств индикаторного поля в модельном варианте известным свойствам развитых турбулентных течений; исследованы метрические характеристики ноль-множеств имитационных временных срезов турбулентности в отсутствие внешней крупномасштабной перемежаемости.

Достоверность полученных автором результатов и научных выводов диссертационной работы подтверждается сравнением статистических свойств экспериментальных данных натуральных исследований перемежаемых стохастических процессов со свойствами предлагаемой модели, а также привлечением строгих математических методов обоснования выдвигаемых положений и известных критериев проверки статистической близости выборок и гипотез.

Практическая значимость. Результаты, полученные в диссертации, позволяют усовершенствовать технику натурального эксперимента, а также выработать методы обработки и интерпретации данных перемежаемой турбулентности, обеспечивающие высокую точность оценки статистических параметров перемежаемости и исключаящие субъективизм экспериментатора.

Апробация работы и публикации.

Основные результаты предлагаемой работы докладывались неоднократно на семинарах кафедры Физики Неравновесных Процессов и Экологии, кафедры Кибернетики и Вычислительной Техники ДонГУ, на их совместном семинаре "Фракталы и турбулентность" при участии представителей кафедры Теории Вероятностей ДонГУ и Физико-Технического института АН УССР г. Донецка (1991 г.). Содержание работы в полном объеме заслушивалось на семинаре

ученого совета Института Гидромеханики АН Украины (г.Киев, 1993 г.). Ряд положений и методик диссертации были представлены на 4 Всесоюзной Школе-семинаре "Методы гидрофизических исследований" (г.Светлогорск, 1992), на 7 Международной Сессии Рабочей Группы "Процессы переноса в океане и их лабораторные модели" (г.Москва, 1993 г.). По теме работы опубликовано 8 работ, список которых приведен в конце реферата.

Личный вклад автора.

Основные теоретические выкладки, результаты имитационного моделирования, а также формулировка и экспериментальное обоснование методики обработки данных перемежаемости, разработка алгоритмов и анализ эффективности их работы на ЭВМ принадлежат лично соискателю. Автором был проведен анализ ноль-множеств имитационных временных срезов турбулентных трасс, численно исследованы фрактальные размерности модельных индикаторных полей, а также дана их физическая интерпретация.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов по работе и списка литературы. Работа представлена на 127 страницах машинописного текста, содержит 54 рисунка и 120 наименований литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обосновывается актуальность диссертации, указываются цели проводимых исследований, практическая ценность и научная новизна работы, формулируются ее основные научные положения и выводы.

В первой главе дан обзор экспериментальных и теоретических исследований по проблеме анализа перемежаемой турбулентности.

В §1 рассматриваются базовые математические модели перемежаемости. Выделяются два основных подхода к изучению этого явления, первый из которых основывается на описании изменения спектров поля турбулентности при наличии перемежаемости, либо исходит из анализа изменчивости его структурных функций, а второй опирается на модель, введенную Коважным и представляющую перемежаемый турбулентный сигнал в виде

$$X_{\gamma}(t) = I_{\gamma}(t)X_1(t) + (1 - I_{\gamma}(t))X_2(t), \quad (1)$$

где $X_1(t)$, $X_2(t)$ - сигналы от турбулентных и нетурбулентных структур соответственно, $I_{\gamma}(t)$ - функция перемежаемости, γ - индекс реализации. Данная модель принята в качестве исходной и отражает связь трех случайных процессов во временной области. Приведены соотношения, связывающие функции плотности распределения (вероятности) и устанавливающие связь корреляционных функций этих процессов через коэффициент перемежаемости γ и среднюю частоту следования турбулентных "пачек" f_{γ} . Приведены дово-

ды в пользу аппроксимации длительностей турбулентных и нетурбулентных "пачек" показательными законами распределения.

В §2 дан обзор характеристик перемежаемой турбулентности, традиционно измеряемых на практике с привлечением функции $I(t)$. В качестве таких характеристик приведены всевозможные условные и безусловные, зонные, точечные, интервальные средние пульсационных моментов для векторных и скалярных величин, вычисляемые в турбулентных и нетурбулентных областях. Описаны также различные их суррогаты, характер звуковые либо структуру движения на турбулентных и нетурбулентных участках, либо границу перехода между ними. Рассмотрено несколько определений средних длительностей турбулентных и нетурбулентных "пачек" и проведен их сравнительный анализ.

В §3 выясняется роль функции перемежаемости в интерпретации границ турбулентных зон, в представлении процессов возбуждения и гашения турбулентности на краях турбулентных "пачек" посредством сравнения интервальных условных и зонных средних с безусловными параметрами течения, в исследовании корреляционно-вероятностных характеристик турбулентного потока с привлечением точечных средних. На основании работ Допазо и Либби [1976] показано, что перенос скалярной функции перемежаемости через границу "турбулентность-нетурбулентность" проявляет важные закономерности ее зависимости от топологии этой границы и характеризует динамику процессов вовлечения.

Во второй главе представлена модель временных срезов перемежаемой мелкомасштабной турбулентности и методы выявления структурных неоднородностей турбулентных полей.

В §1 рассматривается построенная на основе теории стохастических процессов (СП) Лидбеттера и Крамера вероятностная модель пересечений, провалов и выбросов пульсационной энергии случайного турбулентного перемежаемого процесса за некоторый пороговый уровень C^2 . Исходя из справедливости выражения

$$N_x(C) = 2N_0 \exp(-C^2/2\sigma_x^2), \quad (2)$$

полученного для средней частоты следования одноименных пересечений (входов под уровень, либо выходов за уровень C) турбулентного сигнала, где N_0 — среднее количество пересечений "нуля", связанное со скоростью движения датчика $V_{ср}$ и микромасштабом Тейлора соотношением $N = V_{ср}/2\lambda_T$, а σ_x^2 — дисперсия СП в x -структуре, приходим к заключению о принципиальной достижимости любой степени отличия характерных частот пересечений в турбулентной S и нетурбулентной F областях:

$$N_x(C_F)/N_x(C_S) = \exp\left\{C^2(1 - 1/k^2)/2\right\}. \quad (3)$$

Здесь $k = \sigma_S/\sigma_F$, $C_F = C/\sigma_F$. Таким образом показано, что нет априори никакого

преимущества любой иной статистики перед статистикой длительностей выбросов и пересечений. Дальнейший анализ связан с установлением для длительностей пересечений τ_{ni} , провалов $\tau_{прi}$ и выбросов $\tau_{ви}$ асимптотических вероятностных соотношений в широком диапазоне изменения C . Для локально-стационарного СП показано, что поток пересечений уровня C является простейшим, т.е. локально стационарным, ordinарным и не имеющим последствий. Ограниченность второго спектрального момента Γ_2 турбулентности и более быстрое, чем $1/\omega^4$ спадание ее спектра при $\omega \rightarrow \infty$ позволяет распространить асимптотические допущения и на турбулентные СП для высоких уровней сравнения. Обосновано также, что пуассоновость потока пересечений сохраняется и для негауссовых турбулентных СП, т.е. — показательный закон распределения длительностей пересечений так или иначе справедлив для временных срезов мелкомасштабной турбулентности. При этом асимптотические свойства длительностей провалов и пересечений идентичны. В масштабе длины интервалов $m_{i,0} = (1/C)\sqrt{2\pi\Gamma_0/\Gamma_2}$ для нормального СП $\xi(1)$ при $C \rightarrow \infty$ показано, что распределение длительностей выбросов асимптотически близко к релеевскому с параметром $\sqrt{2/\pi}$. Последнее вносит существенную поправку в выводы Данисенко, касающиеся распределения длительностей выбросов. Далее доказывается справедливость приведенной асимптотики для четных преобразований выборочных функций СП $\xi(1)$, тем самым обосновывается применимость модели к преобразованиям сигнала типа квадрирования и взятия модуля. По двум критериям ослабления нормированной корреляционной функции определен диапазон значений уставки C_x , для которого статистические связи между пересечениями на временных интервалах становятся несущественными. Выяснено, что при относительном пороге сравнения $C_x > 2.5$ поток пересечений может считаться пуассоновским а длительности выбросов СП — распределенными по закону Релея. Приведены результаты экспериментальных исследований временных срезов турбулентных СП, полученных в лабораторных и природных условиях; на основании критерия Пирсона проверена справедливость выдвигаемых теоретических положений.

В §2 обсуждаются всевозможные решающие правила для алгоритмов выделения структурно-неоднородных образований. Функция распределения локально-стационарного пуассоновского потока

$$F(k, 1) = (\mu_x 1)^k \exp(-\mu_x 1) / k! \quad (4)$$

определяется параметром его интенсивности μ_x , характеризующим некое среднее расстояние между пересечениями $R_{1,x}$. Интенсивность потока выбросов в кластере μ_x задает ту разрешающую способность, которая еще позволяет выделять на уровне фоновой турбулентности пятна с характерным масштабом $l > R_{1,0x}$. Параметры показательных распределений длительностей пересечений в фоновой и турбулентной областях при заданном разрешении

$R_{i..}$ опишутся как

$$\mu_p = (1/R_{i..}) \cdot (\pi\lambda_T/R_{i..})^{k-1}, \quad \mu_s = 1/R_{i..} \quad (5)$$

а соответствующие с.к.о. длительностей выбросов в перемежаемых структурах выразятся соотношениями

$$\sigma_{\text{рел.г}} = 2\lambda_T/k \sqrt{2 \ln(R_{i..}/\pi\lambda_T)}, \quad \sigma_{\text{рел.с}} = 2\lambda_T/\sqrt{2 \ln(R_{i..}/\pi\lambda_T)}. \quad (6)$$

Из анализа выражений (5), (6) ясно, что отношение мат. ожиданий длительностей пересечений в F-фоне и S-кластере в существенной мере зависит от выбора разрешения (как $R_{i..}^{k-1}$), в то время как соотношение мат. ожиданий длительностей выбросов от разрешения не зависит. Поэтому классификация перемежаемых областей наиболее эффективна для следующих решающих правил построения индикаторных функций А-событий:

$$I_{n_i} = \begin{cases} 1, & A_n : \tau_{ni} < a_n \\ 0, & \bar{A}_n \end{cases} \quad (7)$$

$$I_{np_i} = \begin{cases} 1, & A_{np} : \tau_{npi} < a_{np} \\ 0, & \bar{A}_{np} \end{cases} \quad (8)$$

где a_n, a_{np} - длительности сравнения, а также для отображения по событиям потока Эрланга

$$I_{\alpha}(1) = \begin{cases} 1, & A : N_i > k \\ 0, & \bar{A} \end{cases} \quad l_{\alpha}(1_i, 1_i + \Delta l) \quad (9)$$

где k - коэффициент прореживания исходного потока. По аналогии построено решающее правило для отображения в текущем времени реализации СП.

В §3 приведен анализ априорной информативности исходных признаков классификации неоднородностей турбулентных полей. Исследованы отношения правдоподобия и получены значения энтропии распределения длительностей пересечений и провалов в кластере относительно распределения этих длительностей в фоне. Был сделан вывод о том, что быстрый рост информативности F-кластера на S-фоне обеспечивает лучшее выявление квазиламинарных включений внутри турбулентных пятен, нежели самих пятен на уровне фоновой турбулентности, причем информативность пересечений может быть сколь угодно велика при повышении уставки S . При классификации, осуществляемой по n -кратно прореженному потоку пересечений (потоку Эрланга) информативности $I^{S/F}$ и $I^{F/S}$ будут в n раз выше, что говорит в пользу привлечения решающего правила (9) в процедурах обработки данных перемежаемой турбулентности. Далее устанавливается асимптотическое совпадение информативностей пересечений и провалов, а также аналитически доказывалось, что статистика длительностей выбросов обладает низкой информативностью, в силу чего уступает классификационным свойствам провалов и пересечений.

В §4 обсуждается апостериорная информативность выборки провалов или пересечений и строится алгоритм кумулятивной суммы (АКС) на основании применения последовательного критерия отношений вероятности Вальда к

данным перемежаемой турбулентности. На периодическом множестве координат с шагом Δl $\{l_j = j\Delta l\}$, $j=0, 1, 2, \dots, n$ кумулятивная сумма представима в виде

$$S_n = \sum_{j=0}^n \theta_j \ln(\mu_r / \mu_r) - (\mu_r - \mu_r) \Delta l \cdot n \quad (10)$$

где θ_j - индикатор появления пересечки A на интервала $J_j = (l_{j-1}, l_j)$:

$$\theta_j = \begin{cases} 1, & A \in J_j, \\ 0, & A \notin J_j. \end{cases}$$

Анализ знакоопределенности производной кумулятивной суммы как количества информации о кластере показывает, что КС дрейфует с положительным приращением информативности в турбулентной области и с отрицательным в квазиламинарной, в силу чего может привлекаться в качестве детекторной функции анализа перемежаемости, отмечаящей "переключения" ноль-единичной функции $I(t)$ по превышению кумулятивной суммой информационного порога h . Важным свойством АКС является надежность его работы в условиях нестационарного по уровню интенсивности турбулентности морского фона. Поскольку мера информативности всегда определяется с точностью до постоянного множителя, классификатор перемежаемости не нуждается в переобучении и изменении параметра μ_s^* , первоначально установленного при обучении.

В третьей главе вводится понятие индикаторного поля (ИП) структурно-неоднородной турбулентности, исследуются его геометрия и статистические свойства.

В §1 дается обобщенное понятие многомерной функции перемежаемости, как бинарного поля, получаемого в результате некоторого правила отображения сложной алгебры и вероятностной меры на ней множества событий, порождаемых в каждой точке пространства флуктуациями исходного гидрофизического поля $\xi(x, y, z, t)$ турбулентности. Осуществлено имитационное моделирование отображения стохастических пятен на графотерминале ЭВМ. Показано, что для правила отображения

$$I(x, y, z, t) = \Psi[\xi(x, y, z, t)], \quad \Psi(u', C) = \begin{cases} 1, & |u'| \geq C \\ 0, & |u'| < C \end{cases} \quad (11)$$

нормированные ошибки достоверного выделения перемежаемых структур при известном распределении $W_\xi(x, y, u')$ стохастического поля пульсаций составляют

$$J_s = (1/S_s) \iint_{\Omega_s} dx dy \int_{-\infty}^C W_s(u) du = \int_{-\infty}^C W_s(u) du \quad (12)$$

$$J_r = (1/S_r) \iint_{\Omega_r} dx dy \int_C^{\infty} W_r(u) du = \int_C^{\infty} W_r(u) du$$

и для условных ф.п.р. центрированного СП

$$W_i(u) = \begin{cases} u^\alpha \exp(-u/\beta_i) / \Gamma(\alpha) \beta_i^{\alpha+1}; & u \geq 0, \quad \alpha = -1/2, \quad \beta_i = 2\sigma_i^2 \\ 0; & u < 0, \end{cases}$$

вычисляются как традиционно вводимые ошибки 1-го, 2-го рода

$$\begin{aligned} \Gamma_1 &= J_{\Sigma} = 1 - \Gamma(1/2, C/2\sigma_{\Sigma}) = \operatorname{erf}(\sqrt{C/\sigma_{\Sigma}}), \\ \Gamma_2 &= J_{\Psi} = \Gamma(1/2, C/2\sigma_{\Psi}) = 1 - \operatorname{erf}(\sqrt{C/\sigma_{\Psi}}), \end{aligned} \quad (13)$$

где $\operatorname{erf}(\cdot)$ — функция ошибок, $\Gamma(\cdot, \cdot)$ — неполная гамма-функция. В качестве критерия воспроизведения интервальных мер перемежаемых структур индикаторным полем $\max Q = \max(1 - \Gamma_1(C) - \Gamma_2(C))$. Интегрирование по области кластера в его геометрических координатах позволило установить геометрическую меру ошибок фона и кластера, а также доказало идентичность последней ошибке 1-го рода для O/S и S/O-кластеров. Анализ значений ошибки $\langle \Gamma_{\Sigma} \rangle$ для правил отображения (7), (8) обнаружил ухудшение качества отображения на границе раздела "фон-кластер" и проявление перемежаемого характера границы по нормали к траектории зондирования с увеличением значений параметров (C, a) .

Проекция многомерной функции перемежаемости $\Gamma^*(I, C_{\Sigma}, a)$, называемая кластерограммой, представляет метод выделения кластеров на однородном фоне и отражает статистические свойства выборочной траекторной функции $\xi(l)$ в зависимости от параметров отображающего правила. Ее применение не требует процедур обучения и самообучения, позволяет проводить анализ, задаваясь априори некоторой постоянной мерой ошибки $\langle \Gamma_{\Sigma} \rangle$.

В §2 рассмотрены статистические свойства границы "турбулентность-нетурбулентность" для ИП, получаемого по правилу классификации в реальном времени, для которого оценены средняя смещенность границы $\langle l_{\Gamma} \rangle$ при входе в пятно и при выходе в ламинарный фон (модели O/S и S/O-кластеров), ее дисперсия D_{Γ} и коэффициент изменчивости ν_{Γ} . Получено, что меньшие ошибки деформации отображения границы отвечают малым значениям уровня сравнения C_{Σ}^2 пульсационной энергии турбулентного поля. Установлено, что оценка границы ИП, полученная в реальном времени, совпадает с первым пересечением уровня энергии C_{Σ}^2 турбулентным СП на входе в кластер и с последним пересечением в кластере плюс интервал сравнения a_{Γ} — на выходе из него.

В §3 проведен статистический анализ границ ИП с ограниченной шириной турбулентной зоны при заданном разрешении. Поэтапно исследованы вероятностные свойства отображения O/S, S/O, P/S и P/S/P-кластеров. Найдены функции плотности распределения оценки границы для каждого из вариантов, получено значение ее смещенности, мэт. ожидания и дисперсии. Для P/S-кластера средняя смещенность составляет

$$\langle l_{\Gamma} \rangle = \frac{P(A_{\Sigma}) \{1 - P(A_{\Sigma})\} \cdot [1 + (2 + \mu_{\Sigma} a) \cdot \exp(-\mu_{\Sigma} a)] - P(A_{\Sigma}) \cdot [1 - (\mu_{\Sigma} a + 1) \exp(-\mu_{\Sigma} a)]}{\mu_{\Sigma}}; \quad (14)$$

$$P(A_{\Sigma}) = 1 - \exp(-\mu_{\Sigma} a),$$

$$P(A_0) = \mu_s \mu_f \cdot (1 - \exp(-\mu_f a)) / (\mu_f - [1 - \exp(-\mu_s a)] / \mu_s) / (\mu_s - \mu_f).$$

Проанализирована зависимость качества отображения и геометрической ошибки в приграничных $\langle \Gamma_s \rangle_{гр}$ и стационарной $\langle \Gamma_s \rangle_{ст}$ зонах от ширины турбулентной области $l_{к.л.}$. Показано, что в случае $l_{к.л.} < 2 \langle l_r \rangle$ конфигурация границы в среднем приобретает разрывный характер. Последним объясняется наблюдаемое дробление турбулентной структуры континуальных течений с малой протяженностью турбулентных "локутов" вдоль траектории зондирования. Поэтому была оценена суммарная ошибка разрывного отображения F/S/F-кластера, позволяющая установить оптимальные пороговые параметры его классификации.

В §4 проведено исследование фрактальных свойств имитационных индикаторных полей перемежаемой турбулентности и ноль-множеств временных срезов стационарных турбулентных СП. Рассмотрены размерности модельной границы "турбулентность-нетурбулентность", для которой обнаружен достаточно широкий скейлинговый диапазон с размерностью $D_f \approx 1.34$, включающий два поддиапозона $g < \lambda_T$ и $g > \lambda_T$, где размерности составляют $D_f' \approx 1.0$ и $D_f'' \approx 1.5$ соответственно (рис.1). Эти свойства хорошо согласуются с законами переноса через поверхность развитых турбулентных потоков и свидетельствуют о среднегеометрическом характере микромасштаба Тейлора λ_T по отношению к интегральному L и диссипационному η масштабам турбулентности:

$$\lambda_T / \eta \propto (L / \lambda_T)^{1/2} \quad (15)$$

Показано, что при квазиламинарном фоне с с.к.о. σ_u , пульсаций, не превосходящим по порядку величины колмогоровского масштаба скорости u_T' , масштабируемый интервал тем шире, чем выше относительная интенсивность турбулентности k в пятне: $L / \eta \propto k^2$.

Анализ имитационных ноль-множеств позволил выяснить связь их размерности D_0 с разрешающей способностью $R_{l, \dots}$ рассмотрения турбулентного сигнала, и, на основании теории fWp-трасс интерпретировать ее зависимость степенного показателя спектральной плотности $\beta = 3 - 2D_0(R_{l, \dots})$ от волновых чисел в низкочастотной области спектра пульсаций $u'(t)$. Аналитически установлена зависимость количества элементов покрытия $N_{бок}(r)$ модельного ноль-множества от порогового уровня C_x .

$$N_{бок}(r) = \left[(L_{бок} / r) (1 - \exp(-\mu_x(C_x) \cdot r)) + \right.$$

$$\left. + \mu_x(C_x) \int_0^r \exp[-\mu_x(C_x) \cdot (r-x) - (r-x)^2 / 2\sigma_{x,ред}^2] dx \right] \quad (16)$$

и показано, что ширина скейлингового диапазона определяется выбором разрешения $R_{l, \dots}$ и значением микромасштаба λ_T .

Четвертая глава посвящена теоретическому анализу меры неопределенности и условий разделимости структур при обработке данных перемежаемости.

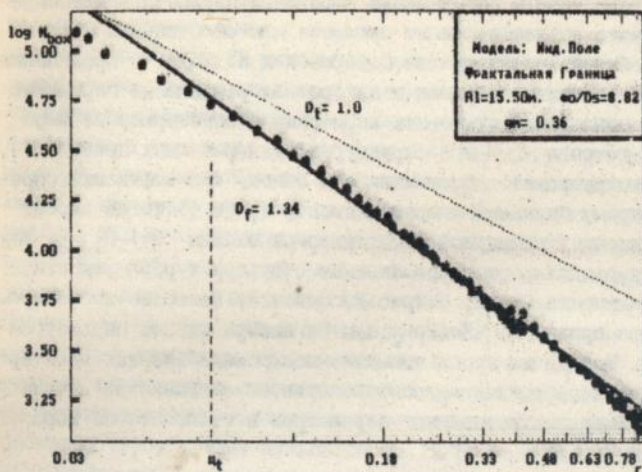


Рис. 1. Диапазон масштабирования границы имитационного ИП.

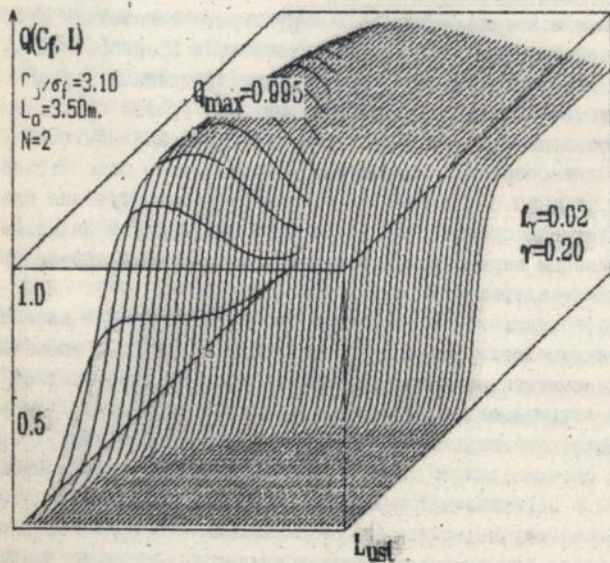


Рис. 2. Поверхность разделяемости перемежаемых структур, построенная для алгоритма классификации (9).

В §1 разработаны методы оптимизации пороговых параметров классификации перемежаемого стохастического процесса для обобщенного эрланговского потока событий. Использование байесовских подходов и применение основ теории распознавания образов в алгоритмах разделения перемежающихся статистик позволили установить априорные и апостериорные меры ошибок 1-го и 2-го рода (в F и S структурах) для решающих правил (7), (8), а также сконструировать дополнительную ошибку классификации, определяемую параметрами "внешней" перемежаемости Γ_γ и γ . Тогда вероятность-дополнение общей суммарной апостериорной ошибки $Q=1-R_{\text{апост}}$ характеризует меру разделимости перемежаемых структур турбулентности, а предельная разделимость $Q_0 = \max Q$ (рис.2) отвечает наиболее достоверным значениям вектора признаков $X=(R_{1..}, a, n)$ и набора оценок параметров $\alpha=(\Gamma_\gamma^*, \gamma^*, \sigma_s^*, \sigma_r^*)$. Исходя из этого возможно построение итерационных процедур обучения и самообучения классификаторов, обеспечивающих автоматический поиск оптимальных уставочных параметров и отслеживание морской перемежаемости.

В §2 проведен анализ ошибок, возникновение которых возможно в процессе работы алгоритма кумулятивной суммы. Численно-аналитическое исследование показало, что ошибки, возникающие при зондировании турбулентной S-структуры, так же, как и квазиламинарной F-структуры, с повышением относительного уровня сравнения C_r и порога h становятся пренебрежимо малыми. Введение дополнительной ошибки $\Gamma_{\text{доп}}$, учитывающей "внешнюю перемежаемость", позволяет устанавливать оптимальное значение уровня C_r для фиксированного информационного порога h . По-видимому, определение вектора признаков (C_r, h) целесообразнее осуществлять посредством пересчета оптимальных параметров (C, a, n) , полученных в процедуре самообучения классификатора для решающего правила (8), используя затем АКС в качестве процедуры идентификации перемежаемых областей, не требующей перенастройки при изменении фоновых условий.

В §3 рассмотрена возможность привлечения имитационного ИП в качестве стохастической модели плоских срезов перемежаемых полей ГДП, свойства которых подвержены изменениям в пространстве. Развитый турбулентный след представляет частный случай наиболее изученных течений такого рода с отчетливо выраженной перемежаемостью. Двухуровневая структура турбулентности следа проявляется во "внешней" перемежаемости крупномасштабных образований и перемежаемости мелкомасштабного "заполнения" турбулентных "пучков", поэтому на основании рассмотрения экспериментального материала исследовался вопрос о степени взаимодействия этих уровней. Анализ коэффициента эксцесса $E_n(z)$ в поперечном сечении следа приводит к заключению об определяющем влиянии внешней перемежаемости на его поведение и о статистической однородности мелкомасштабной пульсационной

структуры внутри турбулентной области, где сигнал имеет близкое к нормальному распределение. С помощью имитационного моделирования реализации турбулентного СП, включающих кластер, показано, что форма профиля интенсивности турбулентности в поперечном сечении следа $\sigma_u(y)$ также обусловлена перемежаемостью на границе и хорошо аппроксимируется линейной комбинацией гауссовых кривых (рис.3), параметры которых определяются шириной перемежаемой зоны. Установлено, что мелкомасштабная структура имеет однородный характер по всему сечению на заданном калибре зондирования X/D и слабо зависит от динамики параметров внешней перемежаемости Γ_γ, γ , обусловленной глобальным временным масштабом автоматического диапазона потока и постоянством числа Струхала в перемежаемой зоне. Поэтому рассмотрен общий случай зависимости качества разрешения мелкомасштабной структуры турбулентности на уровне "фона" и отображения геометрии изоконтуров пульсационной энергии поля ГДП от изменения вниз по потоку величины тейлоровского микромасштаба $\lambda_{T_j}(X/D)$ и с.к.о. интенсивности турбулентных пульсаций $\sigma_{\xi_j}(X/D)$. Получена аналитическая мера ухудшения разрешения структурных неоднородностей вниз по течению; установлен калибр X/D , на котором разрешение следа нереализуемо в силу статистической неразличимости его границ. Предложена стохастическая имитационная модель отображения турбулентного следа в сложных фоновых условиях (рис.4). Проведен анализ изменения статистических параметров мелкомасштабной структуры плоского и осесимметричного следов, на основе которого осуществлено качественное сравнение интенсивностей турбулентного переноса в них через поверхности равных значений пульсационной энергии.

В выводах по работе излагаются следующие основные результаты, полученные в диссертации:

1. Привлечение функции перемежаемости в расчетах условных и безусловных средних позволяет провести многосторонний анализ структурно-неоднородного поля турбулентности и получить важные вероятностно-корреляционные характеристики границы "турбулентность-нетурбулентность".
2. Доказана справедливость интерпретации временных срезов локально-стационарных перемежаемых турбулентных сигналов простейшими потоками случайных событий, а также слабое влияние негауссовости сигнала на законы распределений выбросов, провалов и пересечений.
3. Анализ априорной и апостериорной информативности перемежаемой турбулентности показал целесообразность использования статистики провалов и пересечений в качестве первичных признаков классификации и их информационное преимущество над статистикой длительностей выбросов.
4. Обоснована применимость методов последовательного обнаружения измене-

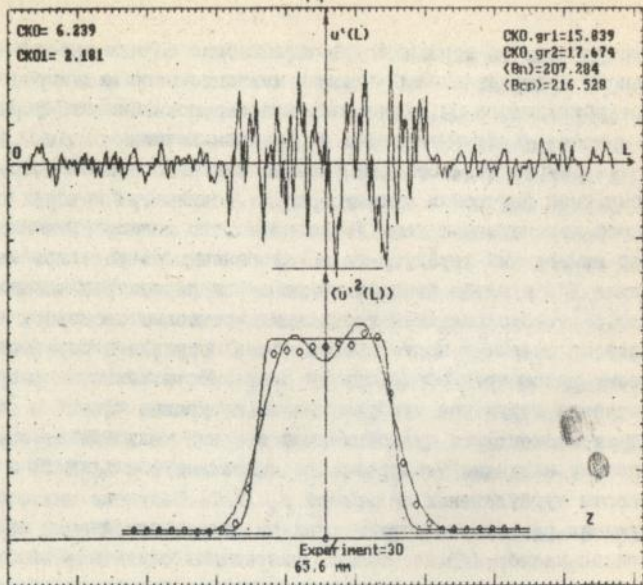


Рис. 3. "Двугауссовский" профиль $\langle u'^2(z) \rangle$, полученный осреднением по ансамблю реализаций.

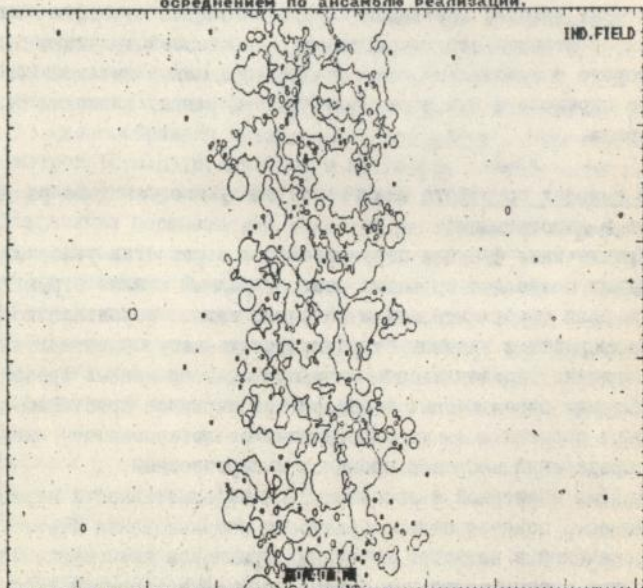


Рис. 4. Имитационная граница равных значения пульсационной энергии турбулентного следа, отображаемая по оси X.

ний свойств временных рядов для нахождения функции перемежаемости в условиях нестационарной "фоновой" турбулентности без переобучения классификатора.

5. Осредненная конфигурация турбулентных пятен морской перемежаемости может быть аналитически оценена по результатам одиночных зондирований как для отображения в реальном времени, так и при повышенном уровне "фоновой" турбулентности.

6. Метод кластерограмм обеспечивает проведение исследований внутренней мелкомасштабной структуры турбулентных зон и поиска кластеров на однородном фоне без привлечения процедур обучения и самообучения классификатора функции перемежаемости.

7. Универсальность фрактальных свойств имитационного индикаторного поля турбулентности обусловлена общностью процессов переноса на границе "турбулентность-нетурбулентность" для скалярных величин, в том числе для функции перемежаемости.

8. Свойства предложенной модели перемежаемости позволяют сформулировать апостериорную меру достоверности результатов ее обработки и сконструировать алгоритмы обучения и самообучения, гарантирующие правильность физической интерпретации полученных данных.

9. Имитация стохастической двухуровневой геометрии перемежаемых структур турбулентных течений позволяет качественно сравнить интенсивности турбулентного обмена через поверхности равных значений пульсационной энергии в плоском и осесимметричном следах.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Кожекин В.А. Информативность параметров классификации структурно-неоднородных перемежаемых стохастических процессов. - Донецк: ДонГУ, 1992. - 8 с. - Деп. в УкрИНТЭИ 02.11.92, №1770-Укр92.

2. Кожекин В.А. Выбор оптимального объема ансамбля реализаций для восстановления профилей вторых моментов затопленной струи // В сб. Физическая гидродинамика. Донецк. ДонГУ, 1991, с.88-95.

3. Тищенко А.Д., Кожекин В.А. Вероятностная модель пересечений, провалов и выбросов для задач классификации перемежаемого турбулентного процесса. - Донецк: ДонГУ, 1992. - 14 с. - Деп. в УкрИНТЭИ 03.07.92, №999-92.

4. Тищенко А.Д., Кожекин В.А. Моделирование стохастической геометрии пятен океанической турбулентности // Методы гидрофиз. исследований: Тез. докл. 4 школы-семинара. М.: 1-7 мая 1992, с.88-89.

5. Тищенко А.Д., Кожекин В.А., Пристром В.А. Применение алгоритма кумулятивной суммы при анализе структурно-неоднородных стохастических сигналов в динамических системах // В сб. Горная механика. НИИГМ им. Федорова. Донецк, 1993, с.181-187.

6. Кожекин В.А., Кожекина В.В. Минимизация байесовского риска для вероятностной задачи классификации перемежаемого стохастического процесса и оптимизация пороговых параметров с целью оценки эффективности функционирующих установок // В сб. Горная механика. НИИГМ им. Федорова. Донецк, 1993, с. 188-196.

7. Повх И.Л., Тищенко А.Д., Кожекин В.А. Фрактальные свойства границы раздела перемежаемой турбулентности. - Докл. АН Украины, 1993, №5, с. 53-56.

8. Tishenko A.D., Kozgeskin V.A. The model of intermittency and effects in the transfer dynamic of the spot interface. - Abstr. Laboratory modeling of dynamic processes in the ocean: The 7-th annual workshop. - Moscow, Aug. 31-Sept. 2, 1993. p. 71.

Подп. в печать 7.11.94. Формат 60×84/16. Бумага серпентина. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 6,32. Усл. кр.-отт. 1,76. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 80 экз.
Заказ № 2-4037.

Институт гидромеханики АН Украины,
252057, Киев, ул. Жетябова, 8/4

ДМП, 340050, Донецк, ул. Артема, 96

AB 29.879